



**HAL**  
open science

## **Utilisation des courbes de force pour l'étude à l'échelle nanométrique des charges piégées dans les diélectriques en couches minces**

Christina Villeneuve-Faure, Abderrhramane Boularas, Laurent Boudou, Kremena Makasheva, Gilbert Teysse-dre

### ► To cite this version:

Christina Villeneuve-Faure, Abderrhramane Boularas, Laurent Boudou, Kremena Makasheva, Gilbert Teysse-dre. Utilisation des courbes de force pour l'étude à l'échelle nanométrique des charges piégées dans les diélectriques en couches minces. 18e Forum des microscopies à sonde locale, Forêt d'Orient, 16-20 Mars 2015, Mar 2015, Forêt d'Orient, France. pp. 109-110. <hal-03034154>

**HAL Id: hal-03034154**

**<https://hal.science/hal-03034154v1>**

Submitted on 1 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Utilisation des courbes de force pour l'étude à l'échelle nanométrique des charges piégées dans les diélectriques en couches minces

Christina VILLENEUVE-FAURE<sup>a</sup>, Abderrahmane BOULARAS<sup>a</sup>, Fulbert BAUDOIN<sup>a</sup>,  
Laurent BOUDOU<sup>a</sup>, Kremena MAKASHEVA<sup>a,b</sup>, Gilbert TEYSSÉDRE<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse; UPS, INPT; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie); 118  
route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 9, France  
<sup>b</sup> CNRS ; Laplace ; F-31062 Toulouse France

L'injection et l'accumulation de charges dans les matériaux diélectriques sont des phénomènes à l'origine de nombreuses applications (électrets, mémoires...) mais également de nombreuses défaillances (décharges électrostatiques, rupture diélectrique, vieillissement...). Pour comprendre et maîtriser ces phénomènes, des techniques de mesure de charge d'espace avec résolution spatiale ont été développées avec succès au cours des dernières décennies. Cependant, leur résolution reste incompatible avec l'étude des films minces (quelques centaines de nanomètres d'épaisseur) qui nous intéresse ici et l'amélioration de cette résolution difficilement réalisable par la voie incrémentale [1]. Pour atteindre une résolution à l'échelle nanométrique, il y a donc une nécessité de développer des techniques de mesure de charges d'espace par des principes différents.

Depuis de nombreuses années, les techniques dérivées de la microscopie à force atomique (AFM) telle que la microscopie à sonde de Kelvin (KFM) et la Microscopie à Force Electrostatique (EFM) nous renseignent à ces échelles. Toutefois, du fait de leurs limitations (faible sensibilité à la position verticale de la charge, modélisation complexe...) elles ne semblent pas adaptées à une mesure en 3 dimensions de la répartition de charges dans le volume de l'isolant.

Nous proposons donc d'utiliser la sensibilité des courbes de force (FDC) à la force électrostatique de façon à mettre au point une nouvelle méthode de mesure de la charge d'espace. Cette méthode, appelée EFDC (Electrostatic Force Distance Curve) permet la mesure directe de la force électrostatique induite par les charges piégées.

Pour démontrer les potentialités de cette technique, nous avons réalisé des injections de charges localisées dans des films minces de  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  déposés par procédé plasma. Les conditions de dépôt ont été adaptées en fonction des propriétés électriques souhaitées [2]. Le choix d'un matériau isolant, présentant une rétention de charges variable en fonction de sa composition, nous a permis d'évaluer les potentialités de la méthode en comparant les résultats obtenus en KFM aux profils de force électrostatique. L'injection de charges et les mesures KFM et EFDC ont été réalisées sous azote, après étuvage à 100°C de l'échantillon, pour s'affranchir de l'influence de la couche d'eau résiduelle.

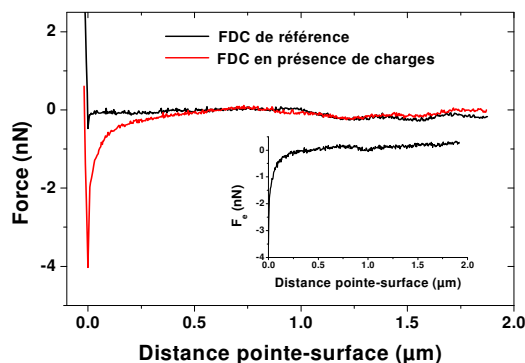


Figure 1. Effet des charges injectées sur la mesure FDC en phase d'approche. En insert, la force électrostatique résultante  $F_e$  (EFDC).

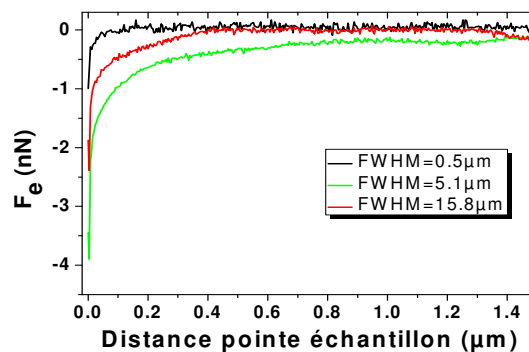


Figure 2. Influence de la largeur à mi-hauteur (FWHM) du spot de charges sur la courbe de force électrostatique (maximum de potentiel KFM égal à 0.9V).

La fig. 1 compare la courbe de force en phase d'approche en présence et en absence de charges piégées dans la couche diélectrique. La soustraction des deux signaux nous permet d'extraire la courbe de force électrostatique comme indiqué dans l'insert. La fig. 2 compare quant à elle les courbes EFDC pour trois conditions d'injection de charges pour lesquelles les profils KFM présentent un maximum de potentiel identique dans les trois cas mais une répartition latérale différente. La forme de la courbe EFDC ainsi que son maximum sont fortement influencés par la largeur de la distribution de charges. De plus, nous avons pu montrer que le maximum de la force électrostatique était également modifié par la densité de charges (ou le potentiel) et par sa position dans la couche (plus ou moins éloignée de la surface). Par conséquent l'EFDC est sensible à la localisation des charges dans le volume ainsi qu'à leur densité.

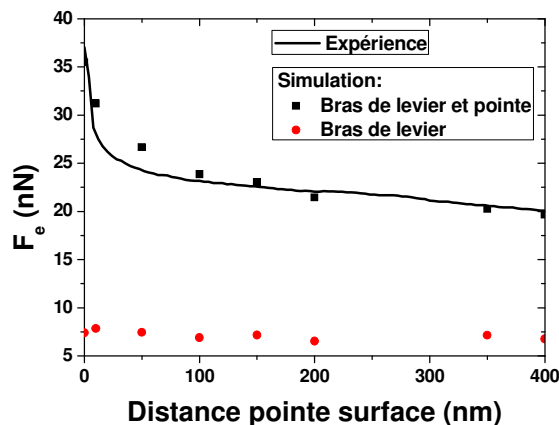


Figure 3. Contribution de la pointe et du bras de levier à la force électrostatique. Comparaison avec les résultats expérimentaux.

Pour pouvoir remonter à un profil de charges à partir de la courbe EFDC, un modèle électrostatique par éléments finis de la pointe AFM et du bras de levier a été développé sous COMSOL [3]. La première étape consiste à valider notre modèle dans une approche simple : pointe à la masse et potentiel appliqué en face arrière de la couche diélectrique. La détermination de la force se fait alors à partir du champ obtenu en résolvant les équations de Maxwell (en l'absence de charges). Nous avons ainsi pu montrer que la forme de la courbe de force était très sensible à la géométrie de la pointe (forme et rayon de courbure) alors que, comme le montre la fig. 3, le bras de levier ne rajoute qu'une composante continue.

Un modèle tridimensionnel a été développé en considérant la géométrie réelle de la pointe (pyramide à 3 cotés) dont les paramètres (rayon de courbure et angle d'ouverture) ont été déterminés par Microscopie Electronique à Balayage. Un très bon accord a été obtenu entre les courbes simulées et expérimentales (fig. 3). Ces résultats pourront ensuite être utilisés pour reproduire la courbe EFDC obtenue à l'aide d'un spot de charges.

## Références

- [1] Teyssedre G., Villeneuve C., Pons P., Boudou L., Makasheva K. and Despax B., *Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* **2012**, 234-237.
- [2] Makasheva K., Despax B., Boudou L. and Teyssedre G., *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2012**, 19, 1195.
- [3] Boullaras A., Baudoin F., Villeneuve-Faure C., Clain S. and Teyssedre G., *J. Appl. Phys.* **2014**, 116, 084106.